

アルミニウム合金バルチモア構橋に関する構造学的研究

その他（別言語等） のタイトル	A Structural Study of the Baltimore Truss Bridge of Aluminium Alloy
著者	中村 作太郎
雑誌名	室蘭工業大学研究報告
巻	3
号	3
ページ	459-475
発行年	1960-06-15
URL	http://hdl.handle.net/10258/3136

アルミニウム合金バルチモア構橋 に関する構造的な研究

中村 作太郎

A Structural Study of the Baltimore Truss Bridge of Aluminium Alloy

Sakutaro Nakamura

Abstract

The deflection of aluminium alloyed bridge is far larger than that of steel bridge, because the modulus of elasticity of aluminium alloy is very small in comparison with that of steel. Therefore, the present writer chose the baltimore truss bridge, considering economical and structural conditions, in designing aluminium alloyed bridge that is railway bridge of simple track with span 30 meters and living load KS-18.

He calculated the secondary stress and the deflection of the above-mentioned baltimore truss bridge of aluminium alloy, assuming that every panel point of truss is elastically fixed. He also found that its secondary stress is a little larger than that of steel bridge and the deflection is considerably decreased by the elastic fixity of panel point of truss and is slightly increased by the influence of the secondary stress of every member. The deflection influenced by the secondary stress, however, proved to be negligibly small in comparison with that of the fixed condition of panel point.

1. 緒 言

アルミニウムは、地球上に最も多く存在する金属元素の一つであり、それが金属として世に現われたのは、1827年にドイツ人 Friedrich Wöhler 氏が、粉末として抽出したのに始まっている。構造用金属として、アルミニウムの主要な特徴は、その軽量であり、適当な元素の配合によつて、鋼、銅以上の強度を有する合金を作り得ることは、大きな魅力である。およそ、橋梁にアルミニウム合金が応用された^{1),2)}のは、1933年に米国の Pittsburgh 市の Smithfield Street 橋がその最初であり、1946年には米国 Massena の Grasse 河に架設された支間 28.5 m のプレート・ガーダー式の鉄道橋があり、つづいて 1948年には英国 Sunderland 跳開橋が、また 1950年の春には、カナダの Arvida にある Saquenay 河にアーチ道路橋が架設せられた。いずれも 14S またはこれに相当する合金で、全アルミニウム橋として架設せられた。また、1950年の秋には、英国 Scotland に全長 94.64 m の連続トラスの全アルミニウム人道橋 Clunie 橋が

完成した。1950年6月には、米国土木学会 (ASCE) から高力アルミニウム合金重構造物示方書^{3),4)}が発表されている。我国においても、1950年以来、船舶、機械、車輛、建築などに着々とアルミニウム合金が用いられている傾向にあるが、橋梁においては、具体的な発展を見なかつた。しかし、1950年秋日本国有鉄道では、鉸桁架換機第2号機製作に際し、その一部の強度部材に高力アルミニウム合金を用いた。これは全長33.4 m、支間22.3 mの下開きの移動トラス⁵⁾である。強度部材に使用せる合金は14S-T6であり、これは重構造物用材料、特に橋梁用材として諸外国において既に標準的のものとされている。またASCEの示方書でも、14S-T6を限定規定している。著者は、昭和31年より学生、研究生の協力を得て、アルミニウム合金構橋の設計に関し、各種の吟味、研究を試みた。すなわちKS-18荷重の鉄道橋(支間30 m)につき、鋼鉸桁橋とアルミニウム合金バルチモア構橋(高力アルミニウム合金材料、14S-T6を主とせるもの)との比較設計^{6),7)}を行なつたところ、その重量は鋼鉸桁橋の67.571 tに対し、アルミニウム合金バルチモア構橋の場合は、24.944 t (アルミ合金の部分22.444 t) となり、その比率は1.0:0.369 (アルミ合金の部分0.332) であり、アルミニウム合金構橋はその軽量性において鋼鉸桁橋よりも著しく優つている事が実証された。

現在のところ、アルミニウム合金材料が可なり高価であるため、その経済性^{8),9),10)}において鋼鉸桁橋に及ばない(工費比較では1.0:1.460でアルミニウム合金構橋の方が高かつた)が、将来アルミニウム合金がもつと安価に入手出来ればすこぶる有利であると考えられる。それは工場組立と現場組立とでは、能率の点で著しい違いがあり、現場組立の能率は工場組立の1/3に過ぎないから、運搬に便利なアルミニウム合金橋は工場組立を多くやることになり、鋼鉸桁橋よりも工費が安くなると考えられるからである。また、橋梁として使用されるアルミニウム合金材料の物理的、化学的並びに機械的諸性異を調べ、橋梁の主要材料としての適否について吟味検討した。その結果、橋にとつてアルミニウム合金の最も大きな欠点は、その強度が鋼と同程度、あるいはそれ以上であるのに、弾性係数 E が鋼の約1/2.9の724,000 kg/cm²なることである。すなわち、 E が小なるため部材の変形、橋の撓み、振動性が増大し、また圧縮材の長柱としての強度が小さくなり挫屈に対しても充分考慮する必要がある。部材の変形、橋の撓みを減少させるためには、節点構造を出来るだけ剛結に近づけることが望ましいわけであるが、その反面、節点に生ずる材端モーメントによる二次応力についても吟味して見る必要に迫られた。すなわちアルミニウム合金の許容応力は、鋼に比べ約2割程度大きいのに弾性係数が上述せる如く小さいため、撓角が大きくなり、二次応力も可なり大きくなるものと予想されたので、計算は非常に面倒であつたが、撓角分配法により、材端モーメントによる二次応力を求め、最大合成応力について断面の検査を試みた。更に、アルミニウム合金バルチモア構橋の中央撓みを、節点を鉸と考えた普通の計算法によつて求めたところ、 $\delta_m=11.486$ cmとなり、意外に大

きいので、鋸接合による節点の固定度を無視することは甚だ不合理である事に気付き、節点を弾性固定と仮定して、部材長に弾性固定係数を乗じ、有効部材長なるものを採用した。また同時に、二次応力の影響をも考慮に入れて撓みを計算した結果、中央撓み $\delta_m = 8.539 \text{ cm}$ となり、普通の計算法に比べ、著しい撓みの減少を見た。これは主として、弾性固定係数に負うところ大であり、二次応力によつては、僅か 1.6% 程度影響されるに過ぎず、而も撓みはこれにより増加する事が実証された。以下順を追つてその詳細を述べる。

2. アルミニウム合金バルチモア構橋の設計^{6),7)}について

支間 30 m のKS-18 荷重を受ける鉄道橋を設計するに当り、アルミニウム合金材を用い、種々型式を比較研究して見た。アルミニウム合金の弾性係数は、上述せる如く、鋼の約 1/2.9 すなわち、 $724,000 \text{ kg/cm}^2$ であつて、振動の割合に多い鉄道橋としては、その撓みを小にするために構を採用し、特に応力並びに経済上の点を考慮して、バルチモア構を選んだ(第1図参照)。

A. 設計事項

荷重: KS-18, 支間: 30.0 m, 構高: 3.9 m,

主構中心間隔: 2.5 m, 型式: 単線上路式バル

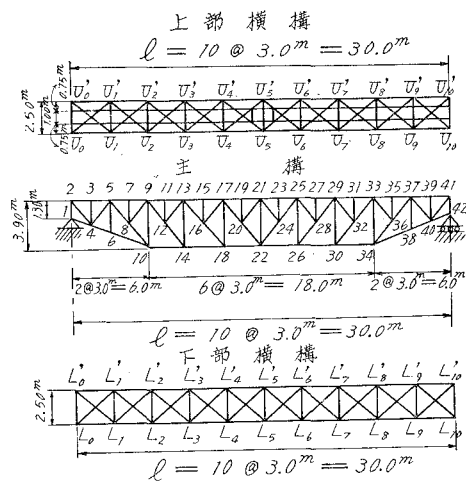
チモア構橋, 材料: アルミニウム合金 14S-T6 (米国材料試験協会 (ASTM) の規格 B 221-49 T (CS 41), B 211-49 T (CS 41) および, B 209-49 T (Clad CS 41) で定められており, 型材として用いる) Alclad 14S-T6 および, R 301-T6 (板材用) A 17S-T3 (冷間圧力締め鋸材用), 61S-T43 (熱間打鋸材用 532~565°C) など, 接合方法: アルミニウム合金鋸接合¹¹⁾, 設計示方書: 米国土木学会高強度アルミニウム合金重構造物示方書^{3),5)} 及び我国における鋼鉄道橋設計示方書。

B. 主構の応力

第1図の如きバルチモア構について、死荷重応力、活荷重応力、衝撃応力を求め、それらを合成すれば第1表のようになる。

C. 横構の応力

第1図において、上横構、下横構に作用する横荷重を鋼鉄道橋設計示方書に基づき算定し、それぞれ支間 $l = 10 @ 3.0 \text{ m} = 30 \text{ m}$, $l = 6 @ 3.0 \text{ m} = 18 \text{ m}$ として、部材応力を求めれば、第2表、第3表のごとくなる。



第1図 バルチモア構橋の骨組図

第1表 バルチモア構部材の一次応力表

種別	部材名		合成力 (kg)	種別	部材名		合成力 (kg)	種別	部材名		合成力 (kg)
上 弦 材	2—3	39—41	— 89,600	材	10—14	30—34	+134,670	鉛 直 補 剛 材	13—18	26—31	+76,320
	3—5	37—39	— 89,600		14—18	26—30	+208,980		17—22	22—25	+56,970
	5—7	35—37	—156,510		18—22	22—26	+187,440		3—4	39—40	—22,800
	7—9	33—35	—156,510	鉛 直 材	1—2	41—42	—119,832	斜 補 剛 材	7—8	35—36	—22,800
	9—11	31—33	—199,110		5—6	37—38	— 9,010		11—12	31—32	—22,800
	11—13	29—31	—199,110		9—10	33—34	—109,050		15—16	27—28	—22,800
	13—15	27—29	—212,500		13—14	29—30	— 80,060		19—20	23—24	—22,800
	15—17	25—27	—212,500		17—18	25—26	— 58,230		8—9	33—36	+14,380
	17—19	23—25	—225,160		21—22		— 41,110		12—13	29—32	+14,380
	19—21	21—23	—225,160	斜 材	2—4	40—41	+129,024		16—17	25—28	+14,380
下 弦 材	1—4	40—22	0		4—5	37—40	+104,140		20—21	21—24	+14,380
	4—6	38—40	+140,890		5—10	34—37	+107,899	注 ①……引張力 (-)……圧縮力			
	6—10	84—38	+140,890	材	9—14	30—33	+102,770				

第2表 上横構部材応力表 (片側荷重)

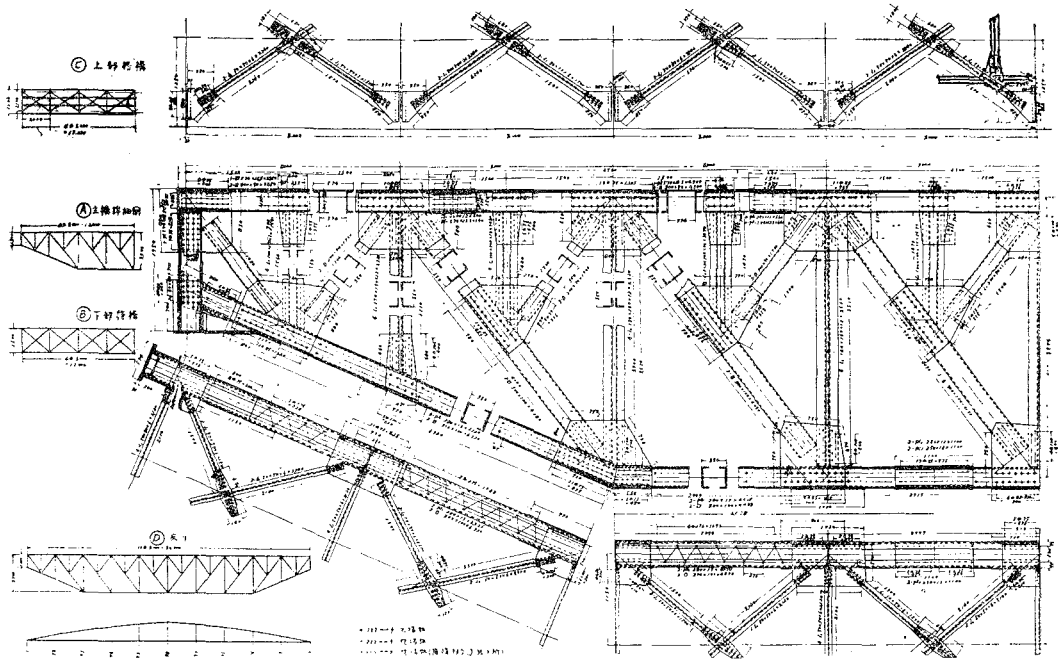
部材名	応力 (kg)	部材名	応力 (kg)	部材名	応力 (kg)	部材名	応力 (kg)
$U_0 U_1$	—14,580	$U_0 U_1$	+16,200	$U_0 U_0$	—13,500	$U_1 U_0$	+7,776
$U_1 U_2$	—27,000	$U_1 U_2$	+14,580	$U_1 U_1$	—12,150	$U_2 U_1$	+5,875
$U_2 U_3$	—33,075	$U_2 U_3$	+27,000	$U_2 U_2$	— 9,504	$U_3 U_2$	+4,311
$U_3 U_4$	—38,880	$U_3 U_4$	+33,075	$U_3 U_3$	— 6,912	$U_4 U_3$	+2,540
$U_4 U_5$	—40,500	$U_4 U_5$	+38,880	$U_4 U_4$	— 4,131	$U_5 U_4$	+1,415
				$U_5 U_5$	— 2,700		

注 (+)……引張力, (–)……圧縮力; 横荷重が反対のときは, 風上, 風下の弦材応力は逆になる。

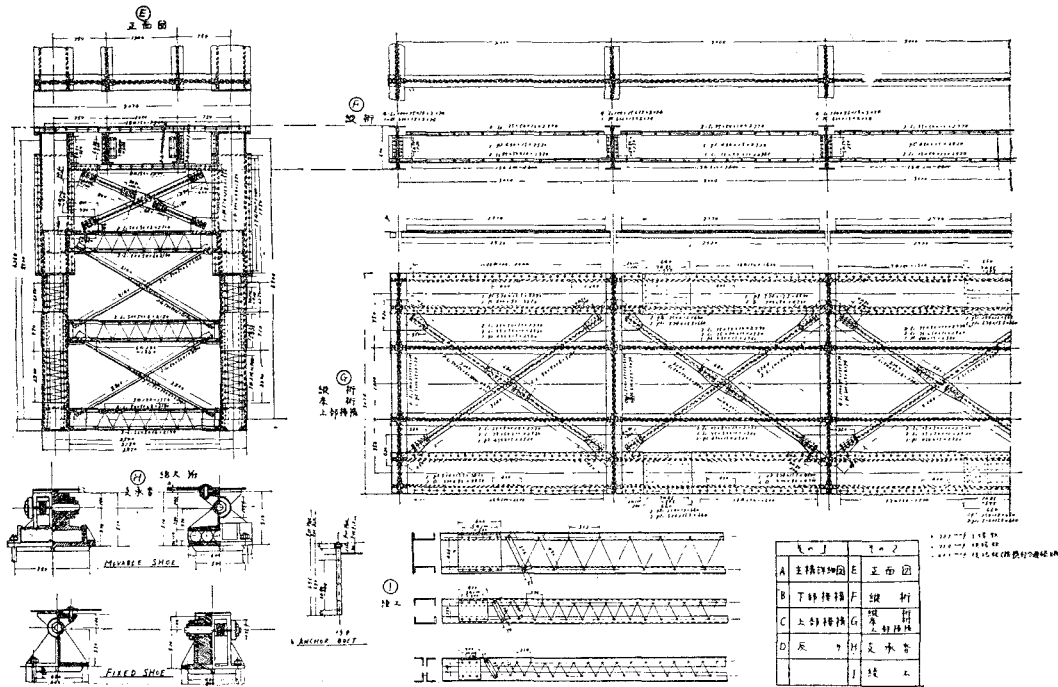
第3表 下横構部材応力表 (片側荷重)

部材部	応力 (kg)	部材部	応力 (kg)	部材部	応力 (kg)	部材部	応力 (kg)
$L_2 L_3$	— 4,870	$L_2 L_3$	+ 5,830	$L_2 L_2$	—4,870	$L_2 L_3$	+6,320
$L_3 L_4$	— 7,830	$L_3 L_4$	+ 4,870	$L_3 L_3$	—4,050	$L_3 L_4$	+3,800
$L_4 L_5$	—17,500	$L_4 L_5$	+17,500	$L_4 L_4$	—2,550	$L_4 L_5$	+1,890
				$L_5 L_5$	—1,620		

注 (+)……引張力, (–)……圧縮力; 横荷重が反対のときは, 風上, 風下の弦材応力は逆になる。



第 2 図 アルミニウム合金バルチモア構橋の主構その他設計図



第 3 図 アルミニウム合金バルチモア構橋の正面、床組その他設計図

以上、第1表～第3表にあげた主構および横構の部材応力より、他の影響をも考慮して断面を決定すれば、第2図、第3図のような設計図が得られる。

D. アルミニウム橋設計に用いる高強度アルミニウム合金 14S-T 6, Alclad 14S-T 6, A 17S-T 3, 61S-T 43 などの諸性質

i. 14S-T 6 の化学成分

銅…4.4%, 珪素…0.8%, マンガン…0.8%, マグネシウム…0.4%, アルミニウム…93.6%。

ii. 14S-T 6 の物理的性質

引 張 強 度……4,200*~4,900 kg/cm²

剛 性 係 数……280,000 kg/cm²

降 伏 強 度……3,700*~4,200 kg/cm²

ポアソン比……1/3

剪 断 強 度……2,900* kg/cm²

伸 び……9~13%

ヤング係数……724,000 kg/cm²

重 量……2,900 kg/cm³

ブリネル硬度……120~130

温度膨脹係数……0.0000216/°C

iii リベット用アルミニウム合金の強度

第 5 表 リベット用 A 17 S-T 3, 61 S-T 43 の強度

リベット打前の材質名	リベット打ち	リベット打後の材質名	剪断強度代表値** (kg/cm ²)
A 17 S-T 4	冷 間	A 17 S-T 3	2,300
61 S-T 4	532~565°C	61 S-T 43	1,700

iv 許 容 応 力

次にあげる許容応力は、リベットとボルトに対するものを除き、すべて 14S-T 6 を対象としている。

a) 軸方向引張応力 1,550 kg/cm²

b) 曲げを受ける形材、桁および集成断面の縁引張応力 1,550 kg/cm²

* ASCE 示方書の規格最小値を示す。

** リベット打後の極限剪断強度代表値 (kg/cm²) を示す。

- c) 軸方向圧縮応力***
- d) 曲げを受ける形材, 桁および集成断面の縁圧縮応力***
- e) 板, 突出脚およびウェブの圧縮応力***
- f) ピンの曲げ応力 $2,400 \text{ kg/cm}^2$
- g) 板およびウェブの剪断応力***
- h) A 17 S-T 3 冷間打ちリベットの剪断応力 700 kg/cm^2
- i) 61 S-T 43 熱間打ちリベットの剪断応力 560 kg/cm^2
- j) 24 S-T 4 仕上げボルトの剪断応力 840 kg/cm^2
- k) ピンの剪断応力 $1,120 \text{ kg/cm}^2$
- l) ピンの支圧応力 $2,100 \text{ kg/cm}^2$
- m) 冷間打ちまたは熱間打ちリベット, 補剛材, リーミングした穴における仕上げボルト, その他密接部分における支圧応力 $2,500 \text{ kg/cm}^2$

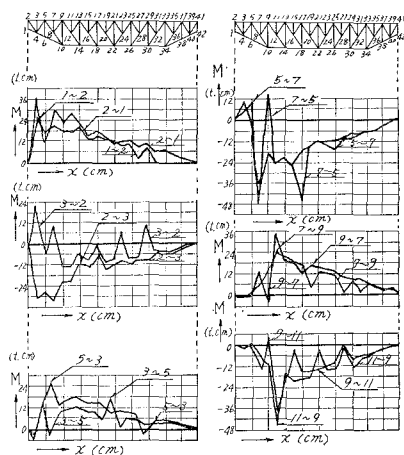
3. 主構の二次応力と撓みに関する吟味研究

アルミニウム合金バルチモア構橋の格点は, 鋸結合であるから, ピン結合と異なり鉸ではなく, 剛結と鉸との中間的結合と考えてよい。その固定度合は, 繋鈑の大きさ, 鋸結の程度などにより当然異つて来るわけである。アルミニウム合金構橋の撓みは, 鋼構橋のそれに比べ, 著しく大きいから, 剛性を増加する意味から云つても, 出来るだけ完全剛結に近づけることが望ましいわけであるが, 強度の高い割に, 弾性係数の小さいアルミニウム合金橋としては, 二次応力の吟味を充分やつて見る事が緊急の問題と考えられたので, 著者はこの研究を試みた。二次応力の計算法は, 既に, Manderla, Müller-Breslau, Ritter, Mohr の諸氏により示されており, 我国においては, 物部長穂¹²⁾, 三瀬幸三郎¹³⁾, 小田弥之助¹⁴⁾, 鷹部屋福平¹⁵⁾, 酒井忠明¹⁶⁾の諸氏によつて計算法が発表されている。本計算は, 鷹部屋博士の撓角分配法^{15), 17)}による図上計算法を用いることにより好成果をおさめた。すなわち, 計算の順序を示せば, 一次応力の計算, 断面計算, 断面積および断面二次モーメント, 剛率 K , $j=2(\sum K_i)$, 撓角分配率 $r=K/j$, 格点変位 Ed , $\Delta=6\sum(Ed_i/l_i r_i)$, 撓角 φ , 材端モーメント, 二次応力の算出となる。

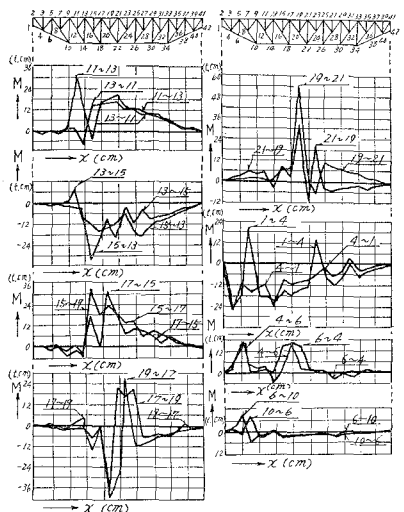
その結果のみ示せば, 材端モーメント (M) の影響線は, 第4図~第8図のごとくなる。

これらの材端モーメントの影響線を利用し, 各部材の最大の材端モーメントを計算し, $\sigma_2=M/I y$ 式により, 二次応力を計算すれば, 第6表のごとくなる。

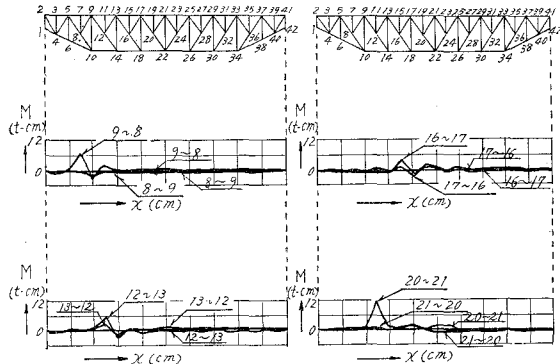
*** 米国土木学会高強度アルミニウム合金重構造物示方書^{3), 4)} 参照



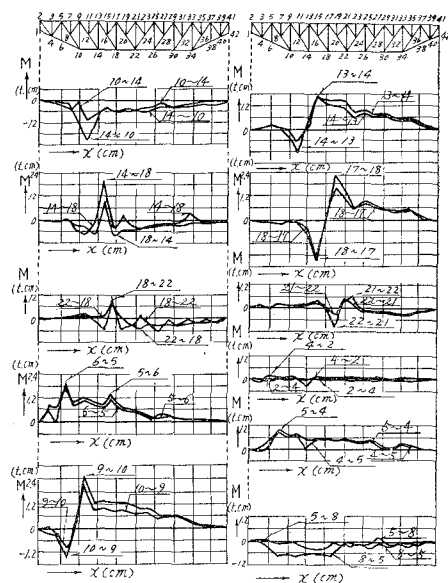
第4図 材端モーメント(M)影響線(1)



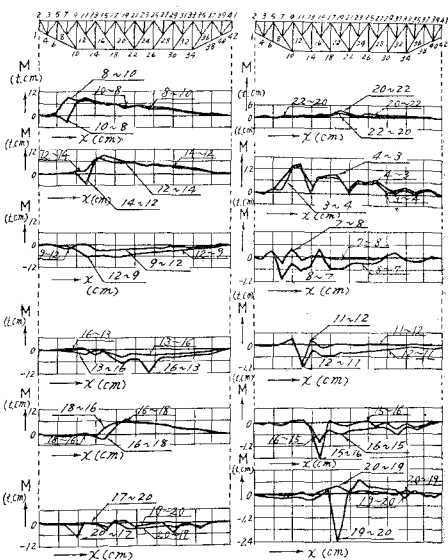
第5図 材端モーメント(M)影響線(2)



第8図 材端モーメント(M)影響線(5)



第6図 材端モーメント(M)影響線(3)



第7図 材端モーメント(M)影響線(4)

第 6 表 バルチモア構橋の一次、二次応力合成表

種 別	部材名	合 成 部材力 S (kg)	部材一 次応力 σ_1 (kg/cm ²)	部材二次応力 σ_2 (kg/cm ²)		最大合 成応力 σ (kg/cm ²)	許容応力 f (kg/cm ²)	二次応力
								最大合 成応力 (%)
上 弦 材	2—3	— 89,600	— 447	+327, —850	—109, +283	—1,297	—1,530(—1,760)	8~66
	3—5	— 89,600	— 447	—134, +349	+208, —541	— 988	〃	14~55
	5—7	—156,510	— 781	+290, —756	—286, +743	—1,537	〃	9~35
	7—9	—156,510	— 781	—209, +543	+236, —614	—1,395	〃	15~45
	9—11	—199,110	— 993	+205, —532	—244, +634	—1,525	〃	13~42
	11—13	—199,110	— 993	—194, +505	+153, —398	—1,391	〃	11~36
	13—15	—212,500	—1,060	+128, —325	—195, +508	—1,385	〃	9~37
	15—17	—212,500	—1,060	—201, +522	+150, —391	—1,451	〃	10~36
	17—19	—225,160	—1,123	— 83, +215	—163, +425	—1,286	〃	6~33
下 弦 材	19—21	—225,160	—1,123	—159, +413	+ 81, —212	—1,335	〃	6~31
	1—4	0	0	±636	∓662	∓ 662	+1,550(+1,783)	96~100
	4—6	+140,890	+ 868	∓193	±326	+1,194	〃	16~27
	6—10	+140,890	+ 868	± 99	∓ 96	+ 967	〃	10
	10—14	+134,170	+ 830	±231	∓357	+1,187	〃	20~30
	14—18	+208,980	+1,287	∓135	∓196	+1,483	〃	9~13
鉛 直 材	18—22	+187,440	+1,155	± 85	∓ 93	+1,248	〃	7~ 8
	1—2	—119,832	— 598	—261, +679	+326, —848	—1,446	—1,475(—1,696)	18~59
	5—6	— 9,010	— 119	±519	∓497	— 638	〃	78~81
	9—10	—109,050	— 916	±269	∓207	—1,185	〃	18~23
	13—14	— 80,060	— 673	±217	∓178	— 890	〃	20~24
	17—18	— 58,230	— 489	±156	∓126	— 645	〃	20~24
斜 材	21—22	— 41,110	— 345	∓ 29	± 23	— 374	〃	6~ 8
	2—4	+129,024	+1,372	± 30	∓ 98	+1,470	+1,550(+1,783)	10~35
	4—5	+104,140	+1,108	∓359	±411	+1,519	〃	2~ 7
	5—10	+107,899	+1,322	±214, ∓350	±439, ∓416	+1,761	〃	12~25
	9—14	+102,770	+1,093	∓131, ∓339	±341, ±370	+1,463	〃	9~25
	13—18	+ 76,320	+ 812	±136, ∓282	±281, ±279	+1,094	〃	13~26
鉛 直 補 剛 材	17—22	+ 56,970	+ 606	±109, ∓216	∓138, ± 74	+ 822	〃	9~26
	3—4	— 22,800	— 300	±367	∓364	— 667	—1,445(—1,662)	55
	7—8	— 22,800	— 300	∓ 20	±246	— 546	〃	4~45
	11—12	— 22,800	— 300	∓ 56	±214	— 514	〃	11~42
	15—16	— 22,800	— 300	∓150	±200	— 500	〃	30~40
	19—20	— 22,800	— 300	∓158	∓ 48	— 458	〃	10~35
斜 補 剛 材	8—9	+ 14,380	+ 318	∓218	±267	+ 585	+1,550(+1,783)	37~46
	12—13	+ 14,380	+ 318	∓189	±120	+ 507	〃	24~37
	16—17	+ 14,380	+ 318	∓ 98	±147	+ 465	〃	21~32
	20—21	+ 14,380	+ 318	∓476	± 97	+ 794	〃	12~60

注 許容応力 f において括弧内の数字は、二次応力による割増しを加算せるものである。

第6表より明かなごとく、構部材の二次応力は、一次応力に比し可成り大きく、その比率が、100%を超過するもの数個あり、30~60%程度のもは無数にあつた。これは、アルミニウム合金が鋼に比べ、その強度が寧ろ多少高いのに、弾性係数が著しく小さいためである事が明かとなつた。すなわち、斜材、5—8, 8—10 が+1,672 kg/cm², +1,761 kg/cm² となり、 $f_i = +1,550$ kg/cm² を8% および14% 超過し、また、上弦材、5—7 が-1,537 kg/cm² となり、 $f_e = -1,530$ kg/cm² を僅かに超過していることは注目に価する。併し、二次応力を考慮せる場合は、許容応力、 f_i, f_e を15% 程度割増しすれば、別に問題なく解決する。次に、支間中央点の撓みを計算し、アルミニウム合金バルチモア構橋の剛性を吟味して見る。

トラスの節点が完全な鉸構造でなくある程度の固定度を有する場合、トラスの任意格点における撓みは、剛節構造のトラスと完全な鉸節構造のトラスとの中間に存在し、しかもその撓み量は節点の弾性的固定度に著しく左右されるものとする。従来のトラスにおける撓み理論は、この節点構造の弾性的固定度を無視しているのは誠に不合理である。殊に、アルミニウム合金構橋のように、鋼構橋に比し、著しく大なる撓み量を示す橋梁においては、その感が深い。著者は、この節点の弾性的固定度を考慮に入れてトラス橋の撓み公式を次のごとく算定する。いま、可能変形法則¹⁸⁾において、仮想荷重 $P_i=1$ および、実際変位状態をとれば、任意の点 i における撓みの一般式は

$$1 \cdot \delta_i = \sum SS \frac{\mu \cdot s}{E \cdot A} + \sum MM \frac{\nu \cdot s}{E \cdot I} + \kappa \sum QQ \frac{\lambda \cdot s}{GA} + \sum \bar{S} \cdot \varepsilon \cdot t \cdot \mu \cdot s + \sum \bar{M} \varepsilon \frac{dt}{h} \nu s \quad (1)$$

によつて示されるが、温度変化を無視すれば、(1) 式は次のごとくなる。

$$1 \cdot \delta_i = \sum SS \frac{\mu \cdot s}{E \cdot A} + \sum MM \frac{\nu \cdot s}{E \cdot I} + \kappa \sum QQ \frac{\lambda \cdot s}{GA} \quad (2)$$

(2) 式において

- | | |
|--|---|
| s : 全部材長 (節点間距離) (cm) | } |
| E : アルミニウム合金の弾性係数 = 724,000 (kg/cm ²) または、724 (t/cm ²) | |
| A : 部材の断面積 (cm ²) | |
| I : 断面の慣性モーメント (cm ⁴) | |
| S : 部材の実軸力 (kg) または (t) | |
| \bar{S} : i 点に $P=1$ kg (または t) が作用するときの部材の仮想軸力 (kg) または (t) | |
| M : 節点における部材の材端実モーメント (kg-cm) または (t-cm) | |
| \bar{M} : i 点に $P=1$ kg (または t) が作用するときの格点の材端仮想モーメント (kg-cm) または (t-cm) | |

(3)

- Q : 部材の実剪力 (kg) または (t)
 \bar{Q} : i 点に $P = 1$ kg (または t) が作用するときの部材の仮想剪力 (kg) または (t)
 G : アルミニウム合金の剪断弾性係数 = 280,000 (kg/cm²) または 280 (t/cm²)
 μ, ν, λ : 節点の弾性固定度係数 = 0.5~1.0
 κ : 剪断弾性補正係数の逆数
 s_e : 有効部材長 (cm)

また、節点の弾性固定度係数 μ, ν, λ を表示する式は次のごとく書くことが出来る。

i) 部材に軸力のみ作用する場合の弾性固定度係数 μ

a) 軸圧縮力を受けるとき

$$\left. \begin{aligned}
 \text{全部材長 } s &= \sqrt{2.5} \pi \sqrt{\frac{EI}{P_k}} = 1.58 \pi \sqrt{\frac{EI}{P_k}} \text{ (cm)} \\
 \text{部材有効長 } s_e &= \pi \sqrt{\frac{EI}{P_k}} = 0.633 s \text{ (cm)} \\
 \mu &= \frac{s_e}{s} = 0.63 \text{ (仮定)}
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

茲に、 P_k : 弾性挫屈荷重¹⁹⁾ (kg)

b) 軸引張力を受けるとき

$$\left. \begin{aligned}
 \text{部材有効長 } s_e &= \frac{1}{2} \left(s + \pi \sqrt{\frac{EI}{P_k}} \right) = 0.817 s \text{ (cm)} \\
 \mu &= \frac{s_e}{s} = 0.817 \text{ (仮定)}
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ii) 部材に材端モーメント、剪断力など作用する場合の弾性固定度係数 ν, λ

$$\left. \begin{aligned}
 \text{部材有効長 } s_e &= \pi \sqrt{\frac{sGI_{\min}}{M_k}} \text{ (cm)} \\
 \text{茲に、} I_{\min} &: \text{断面の最小慣性モーメント (cm}^4\text{)} \\
 M_k &: \text{部材の両端に曲げモーメントを受ける場合の弾性横挫屈曲げ} \\
 &\quad \text{モーメント}^{19)} \text{ (kg-cm)}
 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\nu, \lambda = \frac{s_e}{s} = \frac{\pi}{s} \sqrt{\frac{sGI_{\min}}{M_k}} = \pi \sqrt{\frac{GI_{\min}}{sM_k}} (\doteq 0.750 \text{ と仮定}) \quad (7)$$

以上の式を用い、バルチモア構橋の支間中央点の撓みを求めれば次のごとくである。

第7表 アルミニウム合金バルテモア構橋 (節点は弾性固定) の支間中央点の軸力 S による撓み表

種別	部材名	断面積 A (cm ²)	部材有効長 s_e (cm ²)	$\frac{s_e}{A}$ (1/cm)	\bar{S} (t)	$\bar{S} \frac{s_e}{A}$ (t/cm)	S (t)	$S \bar{S} \frac{s_e}{A}$ (t ² /cm)
上弦材	2—3	200.48	94.950	0.473	-0.385	-0.182	-89.600	+16.307
	3—5	"	"	"	-0.385	-0.182	-89.600	+16.307
	5—7	"	"	"	-0.769	-0.364	-156.510	+56.970
	7—9	"	"	"	-0.769	-0.364	-156.510	+56.970
	9—11	"	"	"	-1.156	-0.547	-199.110	+108.913
	11—13	"	"	"	-1.156	-0.547	-199.110	+108.913
	13—15	"	"	"	-1.538	-0.727	-212.500	+154.488
	15—17	"	"	"	-1.538	-0.727	-212.500	+154.488
	17—19	"	"	"	-1.923	-0.910	-225.160	+204.896
	19—21	"	"	"	-1.923	-0.910	-225.160	+204.896
下弦材	1—4	210.46	125.818	0.598	0	0	0	0
	4—6	"	"	"	+0.629	+0.376	+140.890	+52.975
	6—10	"	251.636	1.195	+0.629	+0.752	+140.890	+105.949
	10—14	"	245.100	1.164	+0.769	+0.895	+134.670	+120.530
	14—18	"	"	"	+1.156	+1.346	+208.980	+281.287
	18—22	"	"	"	+1.538	+1.790	+187.440	+335.518
鉛直材	1—2	200.48	126.904	0.410	-0.500	-0.205	-119.832	+24.556
	5—6	76.00	48.108	2.165	0	0	-9.010	0
	9—10	119.02	75.340	2.074	-0.500	-1.037	-109.050	+113.085
	13—14	"	"	"	-0.500	-1.037	-80.060	+83.022
	17—18	"	"	"	-0.500	-1.037	-58.230	+60.385
	21—22	"	"	"	-1.000	-2.074	-41.110	+85.262
斜材	2—4	119.12	200.982	1.687	+0.631	+1.064	+129.024	+137.282
	4—5	"	"	"	-0.526	-0.887	+104.140	-92.372
	5—8	"	"	"	+0.526	+0.887	+107.899	+95.706
	8—10	"	"	"	+0.526	+0.887	+107.899	+95.706
	9—12	"	"	"	+0.631	+1.064	+102.770	+109.347
	12—14	"	"	"	+0.631	+1.064	+102.770	+109.347
	13—16	"	"	"	+0.631	+1.064	+76.320	+81.204
	16—18	"	"	"	+0.631	+1.064	+76.320	+81.204
	17—20	"	"	"	+0.631	+1.064	+56.970	+60.616
	20—22	"	"	"	+0.631	+1.064	+56.970	+60.616
鉛直補剛材	3—4	76.0	123.435	1.624	0	0	-22.800	0
	7—8	"	"	"	0	0	-22.800	0
	11—12	"	"	"	0	0	-22.800	0
	15—16	"	"	"	0	0	-22.800	0
	19—20	"	"	"	0	0	-22.800	0
斜補剛材	8—9	76.0	200.982	2.600	0	0	+14.380	0
	12—13	77.3	"	"	0	0	+14.380	0
	16—17	"	"	"	0	0	+14.380	0
	20—21	"	"	"	0	0	+14.380	0

注 第7表は、トラスの節点を弾性固定と仮定した場合である。

 $\Sigma +3,084.383$

$$\Sigma S \cdot \bar{S} \frac{s_e}{A} = 2 \times 3,084.383 - 85.262 = 6,083.504 \text{ (t}^2/\text{cm)}$$

$$\therefore \delta_m = \Sigma S \cdot \bar{S} \frac{s_e}{AE} = \frac{6,083.504}{724} = 8.403 \text{ cm}$$

第 8 表 アルミニウム合金バルチモア構橋の各種の影響による支間中央点の撓み表

種別	部材名	部材の節点を弾性固定と仮定せる場合の節点における材端モーメントによる撓み δ_m (cm)							部材の節点を鉸と仮定せる場合の軸力 S による撓み δ_m (cm)				
		断面の慣性モーメント $I(\text{cm}^4)$	部材の有効長 s_e (cm)	$\frac{s_e}{I}$ ($1/\text{cm}^3$)	$M = \frac{1}{2}(M_{mn} \pm M_{nm})$ (t-cm)	$\bar{M} = \frac{1}{2}(\bar{M}_{mn} \pm \bar{M}_{nm})$ (t-cm)	$M \cdot \bar{M}$ ($\text{t}^2\text{-cm}^2$)	$M \cdot \bar{M} \frac{s_e}{I}$ (t^2/cm)	部材全長 s (cm)	断面積 A (cm^2)	$\frac{s}{A}$ ($1/\text{cm}$)	$\bar{s} \frac{s}{A}$ (t/cm)	$S \bar{s} \frac{s}{A}$ (t^2/cm)
上弦材	2-3	45,799	112.5	0.00246	-600.02	- 2.48	+ 1,488.05	+ 3.661	150	200.48	0.748	-0.288	+ 25.805
	3-5	"	"	"	-202.38	+ 4.23	- 856.07	- 2.106	"	"	"	-0.288	+ 25.805
	5-7	"	"	"	- 13.63	+ 0.74	- 10.09	- 0.0248	"	"	"	-0.575	+ 89.993
	7-9	"	"	"	- 74.83	+ 0.848	- 63.46	+ 0.156	"	"	"	-0.575	+ 89.993
	9-11	"	"	"	+107.10	- 6.01	- 643.67	- 1.583	"	"	"	-0.865	+172.230
	11-13	45,799	112.5	0.00246	+112.50	- 0.081	- 9.11	- 0.0224	150	200.48	0.748	-0.865	+172.230
	13-15	"	"	"	+193.38	+ 3.41	+ 659.43	+ 1.622	"	"	"	-1.150	+244.375
	15-17	"	"	"	+138.73	- 0.48	- 66.59	- 0.164	"	"	"	-1.150	+244.375
	17-19	"	"	"	+676.20	+25.43	+17,195.77	+42.302	"	"	"	-1.438	+323.780
	19-21	"	"	"	+212.75	+ 6.36	+ 1,353.09	+ 3.329	"	"	"	-1.438	+323.780
	1-4	22,722	115.5	0.00508	+ 19.75	- 1.78	- 35.16	- 0.179	154	210.46	0.732	0	0
	4-6	"	"	"	-100.13	+ 0.44	- 44.06	- 0.224	"	"	"	+0.460	+ 64.809
	6-10	"	231.0	0.0102	- 27.10	+ 0.47	- 12.74	- 0.130	308	"	1.463	+0.920	+129.619
	10-14	"	225.0	0.00990	+ 95.53	+ 0.30	+ 28.66	+ 0.284	300	"	1.425	+1.096	+147.598
鉛直材	14-18	"	"	"	- 46.40	+ 0.79	- 36.66	- 0.363	"	"	"	+1.647	+344.190
	18-22	"	"	"	+ 6.63	- 0.14	- 0.93	- 0.00921	"	"	"	+2.192	+410.868
鉛直材	1-2	45,799	97.5	0.00213	-178.50	+ 0.99	- 176.72	- 0.376	130	200.48	0.648	-0.324	+ 38.826
	5-6	2,456	195.0	0.0794	0	+ 0.05	0	0	260	76.00	3.421	0	0
	9-10	5,624	292.5	0.0520	+ 11.68	+ 0.18	+ 2.102	+ 0.109	390	119.02	3.276	-1.638	+178.624
	13-14	"	"	"	+ 7.30	+ 0.16	+ 1.168	+ 0.0607	"	"	"	-1.638	+131.138
	17-18	"	"	"	+ 5.65	+ 0.17	+ 0.96	+ 0.0499	"	"	"	-1.638	+ 95.381
	21-22	"	"	"	- 0.53	- 0.21	+ 0.11	+ 0.00572	"	"	"	-3.276	+134.676
斜材	2-4	16,334	184.5	0.0113	+ 18.35	+ 0.15	+ 2.75	+ 0.0311	246	119.12	2.065	+1.303	+168.118
	4-5	"	"	"	- 14.23	+ 0.19	- 2.70	- 0.0305	"	"	"	-1.086	-113.096
	5-8	"	"	"	+ 37.20	- 0.69	- 25.67	- 0.290	"	"	"	+1.086	+117.178
	8-10	"	"	"	+ 6.30	- 0.16	- 1.01	- 0.0114	"	"	"	+1.086	+117.178
	9-12	"	"	"	+ 56.83	+ 1.45	+ 82.40	+ 0.931	"	"	"	+1.303	+133.909
	12-14	16,334	184.5	0.0113	- 7.95	- 0.35	+ 2.78	+ 0.0314	246	119.12	2.065	+1.303	+133.909
	13-16	"	"	"	+ 39.98	+ 1.68	+ 67.17	+ 0.759	"	"	"	+1.303	+ 99.445
	16-18	"	"	"	+ 0.48	- 0.24	- 0.12	- 0.00136	"	"	"	+1.303	+ 99.445
	17-20	"	"	"	+ 29.93	+ 0.71	+ 21.29	+ 0.241	"	"	"	+1.303	+ 74.232
	20-22	"	"	"	+ 17.43	+ 1.05	+ 18.30	+ 0.207	"	"	"	+1.303	+ 74.232
鉛直補剛材	3-4	2,456	146.25	0.0596	+ 0.13	- 0.066	- 0.0086	- 0.000513	195	76.0	2.565	0	0
	7-8	"	"	"	+ 9.22	+ 0.15	+ 1.38	+ 0.0822	"	"	"	0	0
	11-12	"	"	"	+ 6.48	+ 0.22	+ 1.43	+ 0.0852	"	"	"	0	0
	15-16	"	"	"	+ 2.06	+ 0.17	+ 0.35	+ 0.0209	"	"	"	0	0
	19-20	"	"	"	- 8.43	0	0	0	"	"	"	0	0
斜補剛材	8-9	4,986	184.5	0.0370	- 4.00	+ 0.31	- 1.24	- 0.0459	246	77.3	3.182	0	0
	12-13	"	"	"	+ 5.70	+ 0.39	+ 2.22	+ 0.0321	"	"	"	0	0
	16-17	"	"	"	- 4.15	- 0.51	+ 2.12	+ 0.0784	"	"	"	0	0
	20-21	"	"	"	+ 31.50	+ 0.67	+ 21.11	+ 0.781	"	"	"	0	0

 $\Sigma + 49.349$ $\Sigma + 4,292.645$

材端モーメントによる中央点の撓みは、次のごとくになる。(第8表参照)

$$\sum M\bar{M} \frac{s_e}{I} = 49.349 \times 2 - 0.00572 = 98.69228 \text{ (t}^2/\text{cm)}$$

$$\delta_m = \sum M \cdot \bar{M} \frac{s_e}{IE} = \frac{98.69228}{724} = 0.136 \text{ cm}$$

(注 著者は、他に、二・三の別解計算を試みたが、むしろ撓みは小さかつた)

故に、トラスの節点を弾性固定と仮定せる場合の中央点の総合撓みは、剪断力の影響(材端モーメントの直接の影響に比べ遙かに小さい)を無視し、次のごとくなる。

$$\delta_m = \sum S \cdot \bar{S} \frac{s_e}{AE} + \sum M\bar{M} \frac{s_e}{IE} = 8.403 + 0.136 = 8.539 \text{ cm}$$

更に、トラスの節点を完全な鉸と仮定せる場合の中央点の撓みを求めれば、次のごとくなる。(第8表参照)

$$\sum S \cdot \bar{S} \frac{s}{A} = 4,292.645 \times 2 - 134.676 = 8,315.938 \text{ (t}^2/\text{cm)}$$

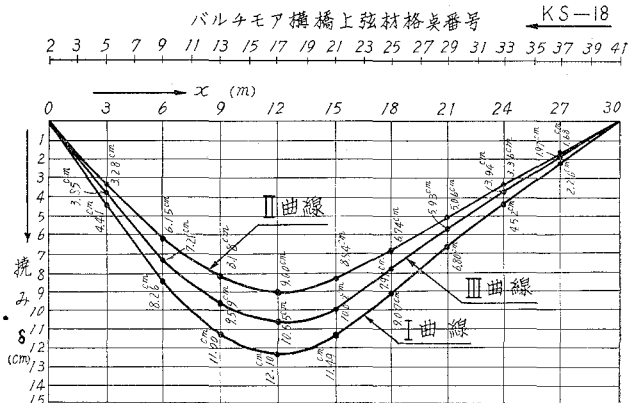
$$\delta_m = \sum S \cdot \bar{S} \frac{s}{AE} = \frac{8,315.938}{724} = 11.486 \text{ cm}$$

そこで、鉸接トラスの節点構造を、安全のため弾性固定と完全な鉸との中間的構造であると考え、両方の撓みの平均値をとれば次のごとくなる。

中央点の撓み $\delta_m = 1/2 (11.49 + 8.54) = 10.02 \text{ cm}$ 同様にして、各格点の撓みを求めれば、第9図のごとくなる。図より明かなように、最大の撓みは支間中央の格点より、少しく左にずれ、17格点において生ずる。(活荷重の方向が反対の場合は、25格点において最大撓みが生ずる)。

また、活荷重、死荷重だけ(衝撃荷重を含まない)の場合の最大撓みは、 $\delta_{17} = 7.29 \text{ cm}$ (鉸結合の場合)で、 $\delta_{17}/l = 1/412$ であり、

活荷重のみ(衝撃荷重を含まない)の場合の最大撓みは、 $\delta_{17} = 5.60 \text{ cm}$ (鉸結合の場合)で $\delta_{17}/l = 1/536$ となる。すなわち、いずれも、鋼鉄道橋設計示方書の規定 $1/1000$, $1/1200$ を遙かに超過



第9図 アルミニウム合金バルチモア構橋の
合成荷重による最大撓み曲線図

- I 曲線：トラスの節点を完全な鉸と考えた場合の撓み曲線
- II 曲線：トラスの節点を弾性固定と仮定した場合の撓み曲線 (鉸と固定の中間曲線)
- III 曲線：トラスの節点を鉸結とせる場合の撓み曲線 (I と II の中間曲線)

するので、この規定からすれば、当然危険なことになるが、鋼鉄道橋の規定をそのまま、アルミニウム合金鉄道橋に用いるのは、当を得ないことは勿論、弾性係数の小さいアルミニウム合金を用いた橋としては、もう少し、この規定を緩和する必要があると思う。現に、Grasse 河に架設されているアルミニウム合金橋梁の実測では、活荷重による最大撓みが支間の約 1/650 であつたが、何らの支障も認められないと報告されている。アルミニウム合金橋の撓み規定については、もつと数多くの架設橋梁について、種々、調査、研究し、また、模型実験によつて吟味、検討する必要があると考えるが、未だ、架設橋梁の数も少なく、実験もあまり行なわれていないので、 δ_{\max}/l の数値に対し、決定的な線を出すことは困難であるが、現在のところ、1/600~1/650 (活荷重のみによる場合) 位が適當ではないかと思う。若し節点を弾性固定と仮定すれば、 $\delta_{\max}/l = 4.773/3000 = 1/628$ となり、稍安全となる。

4. 結 言

A. 主構の設計計算の精度

最初、主構の自重を仮定する際、鋼構橋の支間、30 m に対する自重公式で得た値に比重の比を乗じたものと、過去において架設せられた類型の鋼構橋に対する自重に比重の比を乗じたものとの、平均値をとつて、約 25 t と定めたが、設計の結果、24.944 t となり、この仮定は、ほぼ正しかつたことが証明された。すなわち、精度 = 1/446、誤差 = 0.224%。

B. アルミニウム合金材料についての所見

アルミニウム合金は、鋼鉄に比べ、その比重が著しく小さいことが、橋梁に用いられる際の第一の利点としてあげることが出来るが、その反面、弾性係数が、約 1/2.9 に過ぎず、変位を生じ易しく、取扱いに際しても、慎重な注意を要することなど、その第一の不利な点として指摘することが出来る。しかし、その強度、許容応力は、鋼のそれと比較して約 20% 程度大きいから、それだけ材料を節約することが出来る利点がある。また、その耐蝕性について考えて見るに、アルカリ性分の影響を受ける箇所以外においては、鋼よりも優つているが、他の金属と接触すると腐蝕されやすいから注意を要する。従つて、アルミニウム合金の表面をクロム酸亜鉛、亜鉛質塗料などにて充分塗装する必要がある。

C. 軽量の利点について

同一支間の鋼板桁橋では、設計の結果、自重が 67.571 t となつたのに対し、本アルミニウム合金バルチモア構橋では、24.944 t となり、重量が約 1/3 に軽減されたことは著しい利点である。上部構造の自重が軽くなることは、下部構造をも経済的ならしめ、また、地震時における橋梁の耐震性をも増大せしめ、すこぶる有利である。また、材料、組立品の運搬、架設施工を容易ならしめることは、工費の減少にも直接役立つのみならず、工期をも短縮出来て非常に

有利である。

D. 部材の二次応力について

アルミニウム合金の強度は、鋼より 20% 程度高いのに、弾性係数は、逆に、1/2.9 に過ぎないため、鋼橋よりも、各部材の撓角が、弾性係数の比以上に大きくなり、従つて二次応力も、鋼橋の場合に比べ、大きな比率となつて現われて来た。鋼橋の場合^{12),20)} でさえ、二次応力が一次応力の 30~60% になることは珍しくなく、部材によつては 100% 近くに達することもあるといわれているから、それを上廻るアルミニウム合金橋においては、どの程度大きな二次応力になるだろうと興味をもつていたところ、既に述べた通り、一次応力に比べ 100% を超過する部材も数個あり、30~60% 程度のものは無数にあつた。すなわち、各部材の合成応力も、それぞれ増加し、最大合成応力は斜材 5—10 に生じ、 $1,761 \text{ kg/cm}^2$ となつたが、許容応力を 15% 割増しすれば、 $f = 1,783 \text{ kg/cm}^2$ となり、安全圏内に入ることとなる。しかし、他の部材との応力の釣合上、斜材 5—10 を、少しく補強すれば、より安全である。要するに、この計算の結果、アルミニウム合金構橋の二次応力は、無視出来ない程、大きい（副垂直材、副斜材を有するトラスでは、特に、二次応力が大きい）ということが実証された。

E. 節点の固定度と撓みについて

鋸接構橋の節点は、完全な鉸でもなければ、完全な固定でもない。その中間に存在する弾性固定と称されるべき構造であると考えることが出来るが、厳密に云えばその節点の結合部材（緊鈑など）なり、鋸結の度合などにより、固定度に、自ら差異がある筈である。鋼橋に比べ、アルミニウム合金橋は、著しく撓みが大きいから、トラスの節点の固定度が、撓みに及ぼす影響は無視出来ない。鋼構橋の撓み計算においては、普通、節点の固定度の影響を無視し、完全な鉸として、軸力 S による影響のみによつて撓みを計算している。これがため実物構橋の撓みを実測して見ると、必ず 10~20%^{21),22)} 実測値よりも計算値の方が大きくなっている。このことは、安全側にあるとは云え、誠に不合理と云わざるを得ない。勿論、アルミニウム合金橋の場合は、鋼橋と異なり、強度よりもむしろ、撓みがその橋を決定する要素となつているから、厳密に吟味して見る必要があることは、疑う余地がない。著者は、この意味において、アルミニウム合金パルチモア構橋の撓みを計算するに当り、構の節点を安全のため、弾性固定（固定と鉸の中間）と鉸の中間の存在と考えた。実際はもつと弾性固定に近い固定度になつているかも知れないが、これは模型実験でもやつて見ない限り、判然としないので、安全側の仮定をとつたのである。その結果は、既に、撓みの計算のところで触れたように、死荷重、活荷重、衝撃荷重などの合成荷重による撓みは相当に大きくなるし、死荷重、活荷重のみによる撓みも、活荷重のみによる撓みも、鋼橋の撓み規定では定められない程、大きいのでこれの対策を練らなければならない。撓みを出来る限り小さくするためには、構の節点を出来るだけ剛結に近づ

けることが得策である。剛結に近づければ、節点に二次応力がそれだけ余分に発生し、撓みも幾分増える（本計算では、二次応力による撓みの増加は、わずか 1.6% に過ぎない）がその量は問題とするに足らず、むしろ節点の固定度の増加にともなう一次的の影響（有効部材長の減少）による撓み減少率の方が遙かに大きくなることが実証された。すなわち、格点における繋鈑の増大と、鈑の増加は、アルミニウム合金構橋の剛性を増加し、撓みを増少させるのに極めて有効であると云い得る。

最後に、本研究に協力下された、室蘭工業大学土木工学科、昭和 32 年度卒業生、内山稔、藤田吉臣の両君、同じく昭和 34 年度卒業生、四条博司君、同昭和 33 年度卒業の土木工学教室研究生、江畑真佐留君に心から感謝すると共に、参考文献を提供して下さいた東京大学生産技術研究所、軽金属協会、大東金属工業株式会社、三井物産株式会社、函館ドック室蘭製作所などに対し、深く謝意を表し、また、御高言を賜った北大工学部、今俊三教授、酒井忠明教授に心から敬意を表する次第である。

（昭和 35 年 4 月 30 日受理）

文 献

- 1) 軽金属協会：軽金属資料 No. 44, 1~16 (1950)
- 2) 軽金属協会：軽金属資料 No. 105, 1~15 (1951)
- 3) The American Society of Civil Engineers: Journal Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Volume 82, No. ST 3, 970, 971 (1956)
- 4) 軽金属協会：軽金属資料 No. 96, 1~21 (1951)
- 5) 土木学会：昭和 26 年夏季講習会パンフレット [II] 橋梁 5 (土木学会 1951)
- 6) 中村作太郎：土木学会北海道支部技術資料 No. 14, 71 (1958)
- 7) 中村作太郎：土木学会第 14 回年次学術講演会概要 IV-32 65 (1959)
- 8) 軽金属協会：軽金属資料 No. 279, 1~91 (1956)
- 9) 軽金属協会：軽金属資料 No. 97, 1~25 (1951)
- 10) 東京大学生産技術研究所：生産研究 2 (4), 117 (1950)
- 11) 軽金属協会：軽金属資料 No. 53, 1~30 (1950)
- 12) 物部長穂：土木学会誌 15 (8), 535 (1929)
- 13) 三瀬幸三郎：九州帝国大学工学彙報 10 (4), 189 (1935), 10 (5), 209 (1935)
- 14) 小田弥之亮：複斜材構の応力 第一巻 第 1 版 (丸善 1941), 第二巻 第 1 版 (丸善 1943)
- 15) 鷹部屋福平：土木学会誌 21 (2), 229 (1935)
- 16) 酒井忠明：土木学会誌 25 (2), 98 (1939)
- 17) 鷹部屋福平：一般剛節構の実用解法 第 1 版 p. 103 (岩波 1937)
- 18) 成瀬勝武：弾性橋梁 第 3 版 p. 15~49 (コロナ社 1953)
- 19) 長柱研究委員会：弾性安定要覧 第 1 版 p. 101~196 (コロナ社 1951)
- 20) 畠山 実：土木技術誌 7 (11), 6 (1952)
- 21) 平井 敦：鋼橋 (III) 第 1 版 p. 112 (技報堂 1956)
- 22) 吉町太郎一：鋼橋の理論と計算 第 1 版 p. 14 (石崎書店 1952)